

РАЗВИТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИКЛАДНЫХ РАЗРАБОТОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2024 г. Кай Чжао^{1,**}, Чжедун Гэ^{1,*}, Лянлян Хуо^{2,***}, Ишэн Гао^{3,****},
Юйчэн Чжоу^{1,*****}, Чжихао Яо^{1,*****}

¹Школа информатики и электротехники, Университет Шаньдун Цзяньчжун,
Цзинань 250101, Китай

²Восьмое инженерное подразделение Китайской Строительной Компании,
Шанхай 200112, Китай

³Школа архитектуры и городского планирования, Шаньдун Цзяньчжун,
Цзинань 250000, Китай

E-mail: *gezhedong@sdjzu.edu.cn; **zhao_sdjz@163.com;

1123310614@hit.edu.cn; *gao_sdjz@126.com;

*****zhouyucheng_2016@163.com; *****13573410920@163.com

Поступила в редакцию 18.02.2024; после доработки 18.02.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Деревянные строения свидетельствуют об изысканном мастерстве китайских ремесленников. Из-за природных и человеческих факторов повреждения и разрушения древних деревянных конструкций приводят к потере культурного наследия Китая. Поэтому особенно важно изучить существующие методы выявления дефектов деревянных частей и разработать оптимальные методы реставрации для сохранения деревянных конструкций. Было установлено, что дефекты деревянных конструкций в основном включают в себя растрескивание, гниение, поражение насекомыми, изгиб и вытягивание шпунтов и т.д. Эти дефекты являются основными причинами, влияющими на механические свойства деревянных элементов и угрожающими надежности деревянных конструкций. Для обнаружения этих дефектов были использованы такие методы, как пенетрометр, резистограф, волна напряжения, радар, ультразвук, рентген, инфракрасная спектроскопия и пьезоэлектрические преобразователи, которые относятся к методам полуразрушающего и неразрушающего контроля. Подробно рассмотрены принцип, степень развития и примеры применения технологий обнаружения деревянных зданий, чтобы продемонстрировать преимущества и недостатки этих технологий в различных ситуациях. Необходимо разработать новую и эффективную технологию обнаружения, а также определить направление развития технологии выявления поврежденных деревянных конструкций в будущем.

Ключевые слова: деревянная конструкция, неразрушающий контроль, полуразрушающий контроль, анализ состояния древесины, исследование на месте.

APPLICATION PROGRESS AND PROSPECT OF DEFECT DETECTION TECHNOLOGY FOR TIMBER STRUCTURE MEMBERS

© 2024 Kai Zhao^{1,**}, Zhedong Ge^{1,*}, Liangliang Huo^{2,***}, Yisheng Gao^{3,****},
Yucheng Zhou^{1,*****}, Zhihao Yao^{1,*****}

¹School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University,
Jinan 250101, China

²China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd.,
Shanghai 200112, China

³School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University,
Jinan 250000, China

E-mail: *gezhedong@sdjzu.edu.cn; **zhao_sdjz@163.com;

1123310614@hit.edu.cn; *gao_sdjz@126.com;

*****zhouyucheng_2016@163.com; *****13573410920@163.com

Timber buildings show the exquisite skills of craftsmen in China. Under the influence of nature and human activities, damage and destruction of ancient timber structures lead to the loss of China's cultural heritage. Therefore, it is particularly important to study the existing defect detection methods of timber members and provide excellent restoration plan for the preservation of timber structures. Defects of timber structure members were found to consist mainly of cracking, decay, insect-attack, bending and pullout of tenons, etc. These defects are the main factors that affect the mechanical properties of timber members and endanger the stability of timber structures. Pilodyn, resistograph, stress wave, radar, ultrasound, X-ray, infrared spectroscopy and piezoelectric transducers are all were studies for detection methods mentioned, which belong to semi-destructive testing and non-destructive testing. In detail, the principle, development status and application cases of wood building

detection technology are elaborated to demonstrate the advantages and disadvantages of these technologies in various scenarios. New and feasible detection technology should be developed, and the development direction of damage detection technology for timber structures in the future is put forward.

Keywords: timber structure, non-destructive testing, semi-destructive testing, timber assessment, on-site investigation.

DOI: 10.31857/S0130308224040061

ВВЕДЕНИЕ

Архитектура отражает культурные особенности страны. Если взять в качестве примера Китай, то в наследовании и развитии архитектуры наиболее распространенными и многочисленными с точки зрения сохранности являются деревянные строения. Цицзяочэн — самый ранний из обнаруженных памятников деревянной архитектуры, который был построен 4700 лет назад [1]. Древесина является основным материалом деревянных зданий. Причинами повреждений древесины являются гниение, поедание молью, длительная нагрузка и т. д. [2], которые разрушают деревянные здания. Такие повреждения носят необратимый характер и представляют собой значительную угрозу для конструктивной целостности деревянных зданий.

Выявление повреждений в деревянных зданиях может предотвратить возникновение опасных ситуаций. Например, 12 августа 2012 г. деревянная арка в переулке Хуагуан на улице Хефанг в Ханчжоу обрушилась из-за разошедшихся деревянных колонн, что привело к серьезным жертвам [3]. Деревянные здания подвержены повреждениям, и лишь немногие из них хорошо сохранились, что делает их очень ценными. Повреждения деревянных конструкций происходят как на поверхности, так и внутри. Если повреждения на поверхности можно оценить с помощью визуального осмотра, то выявление внутренних повреждений представляет собой серьезную задачу. В прошлом из-за несовершенства технологий выявление повреждений деревянных конструкций обычно осуществлялось путем визуального осмотра или обстукивания. Несмотря на быстроту и универсальность, визуальный осмотр все еще не позволяет выявить возможные внутренние дефекты.

Учитывая историческую и культурную ценность деревянных зданий, трудно обнаружить внутренние повреждения в процессе обследования, поскольку деревянные конструкции не могут быть разобраны или разрушены. Основываясь на этой проблематике, многие ученые провели исследования и предложили различные методы обнаружения внутренних повреждений в деревянных конструкциях, опираясь на такие разделы физики, как механика, электромагнетизм, оптика, акустика и другие.

ВИДЫ ДЕФЕКТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Снижение прочности и безопасности зданий, а также сложности в поддержании в надлежащем состоянии стационарных деревянных конструкций делают повреждение деревянных конструкций важным фактором, который необходимо учитывать. В данном исследовании представлены пять типов повреждений деревянных конструкций на примере нескольких известных зданий.

Здание Эль Коррал дел Конде расположено в Сербии. Оно было построено герцогом Оливаресом в 1561 г. Деревянные колонны здания сильно растрескались, а нижняя часть сгнила из-за изменения влажности и биологического поражения деревянных компонентов. Деревянная пагода Инсянь была построена в 1056 г. и имеет богатую историю. Она расположена в уезде Инсянь провинции Шаньси и является одной из старейших деревянных пагод в Китае. Однако из-за сотен лет землетрясений и длительного периода атмосферной коррозии деревянные конструкции деревянной пагоды Инсянь сместились, перекошились, а некоторые внутренние колонны даже растрескались.

Поверхностное растрескивание, показанное на рис. 1а, — частое явление для древних деревянных конструкций, подвергающихся воздействию внешних условий. Внутреннее растрескивание древесины происходит на более поздней стадии сушки древесины и вызвано растягивающим напряжением внутри деревянного каркаса. Балки и колонны, как несущие деревянные элементы, наиболее подвержены растрескиванию.

Гниение и поражение насекомыми также зависят от влажности древесины, однако они не связаны с растрескиванием. В качестве примера можно привести дом Фуцзю Чжоу и монастырь Христа в Томаре. В результате разрушения колонны дома Фуцзю Чжоу обветшали, что привело к необходимости сноса некоторых зданий. В настоящее время основное здание представляет собой четырехугольную резиденцию [4]. Монастырь Христа в Томаре был построен в XII веке в Португалии. Из-за того, что часть крыш зданий построена с использованием деревянных конструкций, стропила и обрешетка существующих крыш были поражены насекомыми и сгнили.



Рис. 1. Примеры дефектов древесины.

Древесина — сложный материал, состоящий в основном из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, которые служат питательной средой для бактерий, грибов и насекомых. Грибковые гифы широко распространены по поверхности деревянного столба (рис. 1б), а вся нижняя часть столба полностью разедена. Ключевыми внешними факторами, вызывающими гниение древесины, являются температура и влажность [5], поэтому гниение широко распространено в дождливых регионах южного Китая. Насекомые, такие как термиты, жуки-долгоносики и пчелы-плотники, питаются древесиной и откладывают яйца на поверхности или внутри деревянных конструкций.

После вылупления личинки питаются древесиной, в итоге на поверхности деревянных конструкций остаются лишь небольшие отверстия, однако внутренняя часть значительно разрушена. Опилки, показанные на рис. 1в, являются результатом того, что насекомые вгрызаются в деревянные строения для строительства гнезд. Поражение насекомыми и гниение могут снизить несущую способность деревянных конструкций, тем самым создавая угрозу безопасности этих деревянных зданий, включая днища колонн, заглубленные колонны стен и деревянные стропила.

Существует еще два распространенных типа дефектов в деревянных конструкциях, а именно изгиб (рис. 1г) и вытягивание шпунтов (рис. 1д). Крыша монастыря Христа в Томаре подверглась значительному весу и деформации под действием силы тяжести, вызванной неравномерным поглощением и выделением воды древесиной, что привело к неравномерному высыханию и усадке в радиальном и хордовом направлениях, в результате чего возникло явление изгиба. Сильное вытягивание шпунта может привести к его разрушению, что затруднит ремонт строительной конструкции. Вытягивание шпунта произошло в зале Шакия Мани храма Цзюэюань, расположенного в городе Гуаньюань провинции Сычуань [6]. В данном исследовании представлен полный обзор определений, причин, влияющих факторов и характеристик пяти распространенных типов повреждений деревянных конструкций (табл. 1).

ПОЛУРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Все методы контроля повреждений, описанные в данной статье, можно разделить на две категории: полуразрушающие (ПРК) и неразрушающие (НК). ПРК может привести к незначительным

Таблица 1

Типы дефектов в деревянных конструкциях

Тип дефекта	Определение	Причина возникновения	Влияющий фактор	Отличительные особенности
Трещинообразование	Древесина растрескивается из-за внутренних напряжений или внешнего воздействия	Влажность или степень высыхания древесины различны, внутренняя и внешняя усадка древесных волокон неравномерна, что приводит к появлению трещин	Содержание влаги, метод сушки, материал	Поверхностные трещины, уменьшение грузоподъемности
Гниение	Древесина подвергается гниению в результате воздействия воды или окисления в течение длительного периода времени	Под воздействием таких факторов, как температура и влажность, размножающиеся грибки разъедают древесину, что приводит к снижению ее качества	Содержание влаги, температура, свет, влажность, содержание кислорода и питательных веществ	Поверхность неровная, с выбоинами или серьезной потерей качества, а прочность древесины сильно снижена
Поражение насекомыми	Лунки, гнезда или следы коррозии, вызванные насекомыми, поедающими древесину	Вредоносные насекомые, такие как термиты, мучные черви, осы и т.д., поедают древесину	Содержание влаги, влажность, материал древесины и питательные вещества	Поверхностные повреждения, пустоты внутри древесины, серьезная потеря качества, серьезное снижение прочности древесины
Изгиб	Состояние древесины, при котором возникает искривление или изменение формы в одной или нескольких точках	Накопление деформации под воздействием длительного давления или действия силы тяжести	Материал древесины, расположение точек воздействия и прочность	Деревянная конструкция изгибается, провисает или даже раскалывается, а прочность снижается
Вытагивание шпунтов	Деревянные элементы вытагиваются из врезного и шпоночного соединения	В шпунте и врезном соединении появляются трещины или древесина подвергается усушке, что приводит к вытагиванию шпунта под действием внешних сил	Материал древесины и сила воздействия на врезные соединения	В структуре врезного соединения образуются зазоры, прочность соединений снижается, что приводит к их повреждению и поломке

повреждениям на контролируемом объекте, например, в результате сверления. По сравнению с ПРК, НК имеет многочисленные преимущества в обеспечении целостности деревянных конструкций, которые необходимо проконтролировать.

Пенетромтр

Пенетромтр (Pilodyn) состоит из толкающего рычага, фиксированной ножки, ударной иглы и т.д. Ударная игла входит в древесину с точным и равномерным усилием для измерения глубины, что является принципом определения плотности древесины с помощью пенетромтра (рис. 2).

Чтобы обеспечить точность данных измерений, для полевых испытаний следует использовать один и тот же пенетромтр. Часовая стрелка детектора должна быть направлена на центр контролируемой древесины [7].



Рис. 2. Пенетрометр и принцип его действия.

Пенетрометр оценивает плотность древесины как один из важных показателей для оценки механических свойств древесины [7] и для облегчения выявления повреждений в деревянных конструкциях. Нейч Талер и др. [8] обнаружили, что существует корреляция между глубиной проникновения ударной иглы пенетрометра и потерей массы древесины. Чем выше степень гниения древесины, тем больше глубина проникновения бойка. Кроме того, была определена зависимость между глубиной проникновения иглы на осевом и радиальном участках и потерей массы. Шанг Даджун и др. [9] в качестве объекта исследования выбрали деревянные конструкции дворца Потала и Норбу Лингпа в Тибете и обнаружили, что точность контроля с использованием пенетрометра выше, чем у визуального метода. Хуан Ронгфенг и др. [10] классифицировали рассохшиеся деревянные конструкции, полученные из Зала воинского мастерства Дворцового музея, и оценили радиальную и тангенциальную плотность деревянных конструкций с помощью пенетрометра. Было обнаружено, что изменения плотности древесины в результате гниения не коррелируют с породой дерева. Чтобы провести количественный анализ повреждений древних деревянных конструкций, была создана регрессионная модель между плотностью древесины и глубиной проникновения пенетрометра. Таким образом, пенетрометр является эффективным средством для контроля дефектов деревянных элементов древних конструкций, особенно в результате гниения и поражения насекомыми.

Резистограф

Резистограф может управлять сверлами разных размеров, чтобы они равномерно вращались в древесине. В процессе контроля [11] сверло должно двигаться в направлении, перпендикулярном текстуре древесины. Результаты анализа данных резистографа могут быть представлены в виде графиков волновых форм (рис. 3), где различные сегменты волновой формы представляют внутреннюю информацию о древесине. На основе данных, полученных резистографом, можно определить плотность поперечного сечения древесины. Пиковое значение соответствует области с высокой плотностью, в то время как значение в области минимума соответствует области с низкой плотностью, а сопротивление сверлению полностью разложившейся древесины является наименьшим. Внутренняя влажность древесины влияет на сопротивление сверлению резистометра [12].

Хуан Ронгфенг и др. [13] и Чжан Хоуцзян и др. [14] провели экспериментальные исследования с использованием материалов, полученных из Зала воинского мастерства и храма Чжэнцзюэ в Юаньминьюане (Старый летний дворец). Они обнаружили линейную зависимость между плотностью древесины и сопротивлением сверлению, где большая плотность древесины соответствует увеличению сопротивления сверлению. Для точного прогнозирования плотности древесины Синь Ли и др. [15] использовали относительное сопротивление сверления и относительное сопротивление подачи в качестве опорных переменных для определения плотности древесины и ввели теоретическую модель распространения информации. Точность результатов прогнозирования плотности была наиболее высокой, когда значения относительного сопротивления сверления и относительного сопротивления подачи составляли 0,2 и 0,8 соответственно.

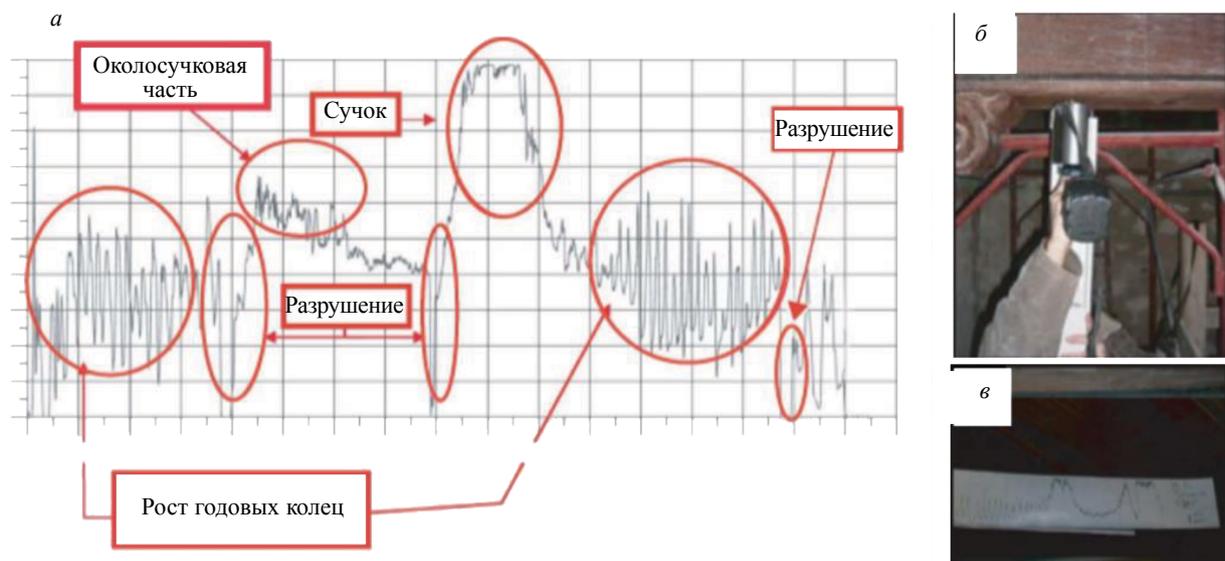


Рис. 3. График примера профиля сопротивления сверлению и описание изменения плотности (а), резистограф (б), распечатка резистограммы (в).

Возможности резистографа по поиску дефектов весьма высоки [16, 17], а резистограф может быть сопряжен с другими системами для облегчения диагностики деревянных конструкций [18]. Анализ геометрических характеристик неровных участков деревянных балок под влиянием затухания достигается с помощью измерений резистографа и лазерного сканера. Также можно определять, отклонилась ли траектория бурения резистографа. Jaime Cuartero и др. [19] улучшили вышеупомянутый метод и разработали трехмерную (3D) параметрическую модель, имитирующую разрушающееся состояние деревянных зданий, используя данные измерений резистографа и лазерного сканера.

Волна напряжения

Систему регистрации волн напряжения можно классифицировать как однопутевую или многопутевую. Принцип действия детектора заключается в том, что ударный молоток бьет по датчику с блоком измерения ускорения с постоянной частотой, вызывая волну напряжения, распространяющуюся по древесине. Датчик принимает этот сигнал и рассчитывает время распространения звуковой волны между двумя датчиками. Направление и скорость распространения волны напряжения будут ослабляться дефектами [20, 21]. Связь между частотным спектром сигналов волн напряжения и механическими свойствами древесины позволяет идентифицировать расположенные в ней дефекты, такие как гниение, растрескивание, поражение насекомыми.

Чтобы изучить зависимость между количеством датчиков и точностью обнаружения, в лесном бюро Dailing в провинции Хэйлуцзян было отобрано 10 дефектных бревен [22]. Было обнаружено, что чем больше датчиков, тем точнее изображение поперечного сечения древесины отражает реальную ситуацию. Группа вывела два уравнения, связанные с количеством датчиков, используя степень соответствия изображения и коэффициент ошибок в качестве зависимых переменных. Метод расчета уравнения следующий:

$$y_1 = 0,22 + 0,058x, x = \{3, 4, \dots, 12\}; \quad (1)$$

$$y_2 = 2,787 - 0,247x, x = \{3, 4, \dots, 12\}, \quad (2)$$

где y_1 — показатель степени соответствия изображения; y_2 — коэффициент ошибки; x — количество датчиков. Для контроля древесины диаметром 200—400 мм требуется не менее 12 датчиков. Для достижения точности обнаружения более 90 % [23] необходимо иметь не менее 22 датчиков.

Томография волн напряжения является одним из важных методов визуализации волновых сигналов напряжения. Feng Nailin и др. [24] провели исследование характеристик распространения

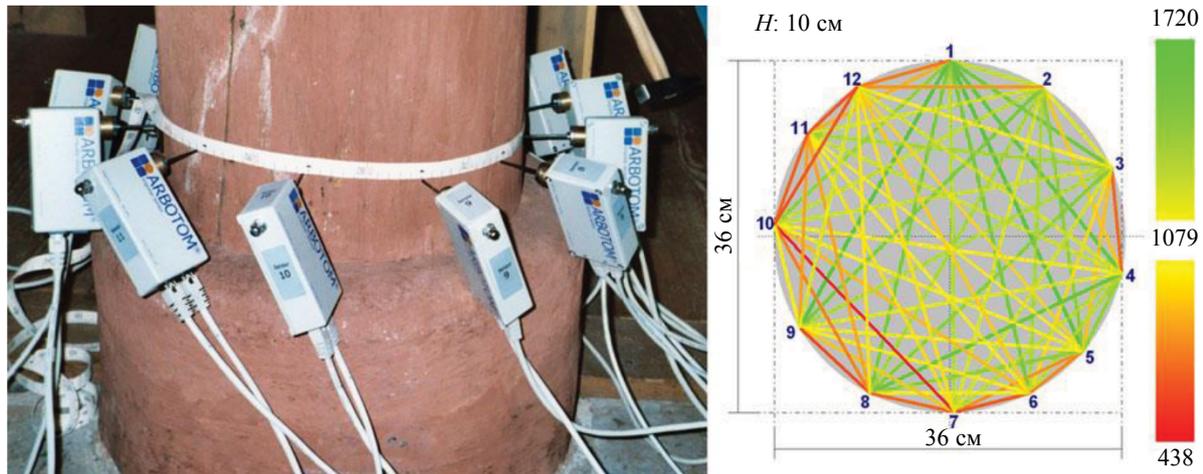


Рис. 4. Контроль на месте многопутьевой волны напряжения в деревянной колонне.

ния волн напряжения в древесине, проанализировав скорость распространения при наличии в древесине гнили или других дефектов. Huan Zhan и др. [25] предложили алгоритм томографии для коррекции ошибок скорости при томографии древесины, который повысил точность томографии волн напряжения и точность оценки повреждений древесины. Алгоритм восстановления изображения волн напряжения преобразует полученные данные в изображение распространяющихся волн, отображая внутренние дефекты древесины различными цветами (рис. 4).

Du Xiaochen и др. [26, 27] внесли множество усовершенствований в алгоритм восстановления изображений волн напряжения. Во-первых, они предложили усовершенствованный алгоритм эллиптической пространственной интерполяции и использовали метод компенсации скорости для получения более точных пространственных интерполяционных данных. Это позволило эффективно решить проблему интерференции плотности при реконструкции формы поперечного сечения ствола дерева в дефектных областях. Впоследствии для дальнейшего усовершенствования алгоритма были внедрены алгоритм сегментации лучей, основанный на технологии эллиптических окрестностей, и алгоритм сегментационной эллиптической пространственной интерполяции. Они были использованы для сегментации пучков лучей волн напряжения и оценки скорости распространения волн напряжения, что позволило более точно определить размер и форму внутренних дефектов в древесине. Du Xiaochen и др. [28] также провели исследование по трехмерной визуализации волн напряжения. На основе алгоритма Kriging был предложен метод выявления внутренних дефектов в древесине с помощью трехмерной визуализации волн напряжения, названный TKriging. Этот алгоритм демонстрирует более высокую стабильность, а извлеченная форма области дефекта близко приближается к реальной форме дефекта, со средней относительной ошибкой всего 24,97 %.

Zhang Junjie и Kourosh Khoshelham [29] предложили метод, сочетающий ближнюю фотограмметрию с технологией звуковой томографии для трехмерного восстановления как внешней, так и внутренней поверхности дерева. Для получения координат акустического датчика используется время распространения звуковой волны и фотограмметрическая модель, а для получения внутреннего состояния дерева применяется пространственная интерполяция скорости звуковой волны.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Метод неразрушающего контроля деревянных конструкций в основном использует акустические и оптические методы для оценки архитектурных повреждений без изменения структуры и механических характеристик элементов здания.

Рентгеновское излучение

Когда рентгеновское излучение проходит через объект, его поглощение зависит от плотности, толщины и энергии пучка излучения объекта. Устройство приема рентгеновского излучения собирает сниженную энергию рентгеновского излучения, а компьютер генерирует проекционное изображение объекта. С помощью методики формирования рентгеновских изображений можно получать двухмерные проекционные и томографические изображения, а трехмерные изображения создаются путем комбинации нескольких томографических изображений. Рентгеновское излучение подходит для контроля дефектов древесины [30].

Brian V. Funt и Edwin C. Bryant [31] разработали систему анализа изображений, полученных методом компьютерной томографии (КТ), для выявления различных типов дефектов, таких как гниение и трещины в древесине, опираясь на такие характеристики, как уровень серого цвета изображения, количество пикселей на дюйм и форма интересующей области. Johan Skog и Johan Oja [32] обнаружили, что, используя данные рентгеновского и трехмерного сканирования в сочетании с компенсацией длины пути, можно определить прогнозируемую плотность заболони и сердцевины для бревен в поперечном сечении. Связь между плотностью древесины и рентгеновскими изображениями исследовали Thomas Lechner и др. [33]. Они предложили метод количественной оценки плотности древесины по значениям градаций серого, полученным на рентгеновских снимках. С помощью калибровочного клина была получена линейная корреляция между интенсивностью градаций серого на рентгеновских изображениях и соответствующими измерениями плотности. Работоспособность этого подхода была экспериментально подтверждена на примере деревянных балок.

Kaori Fujita и др. [34] произвели обследование колонн храма Кенчо-дзи в Японии и создали модель данных. Была показана эффективность использования рентгеновского излучения для контроля дефектов деревянных конструкций. Gao Yisheng и др. [35] использовали метод компьютерной томографии для восстановления деревянных конструкций, разрушенных пчелами-плотниками, и отверстия в согах внутри деревянных конструкций были отчетливо видны, демонстрируя тем самым огромный потенциал технологии компьютерной томографии в области выявления дефектов деревянных конструкций. Это свидетельствует о значительном потенциале метода компьютерной томографии в области контроля деревянных конструкций. Средством контроля, использованным Gao Yisheng и коллегами, является медицинская компьютерная томография (рис. 5а). На рис. 5б показаны восстановленные результаты внутреннего контроля деревянных конструкций. Niclas Björngrim и др. [36] провели обследование восьми балок моста Lejonström, второго по длине деревянного моста в Швеции, и на КТ-изображениях были обнаружены явные признаки трещин и гниения внутри деревянных балок. Кроме того, применение рентгеновской дифракции при исследовании баясины из деревянной пагоды Иньсянь позволило точно определить изменения в кристаллической структуре целлюлозы, что подтверждает преимущество применения рентгеновского излучения в области неразрушающего контроля [37].

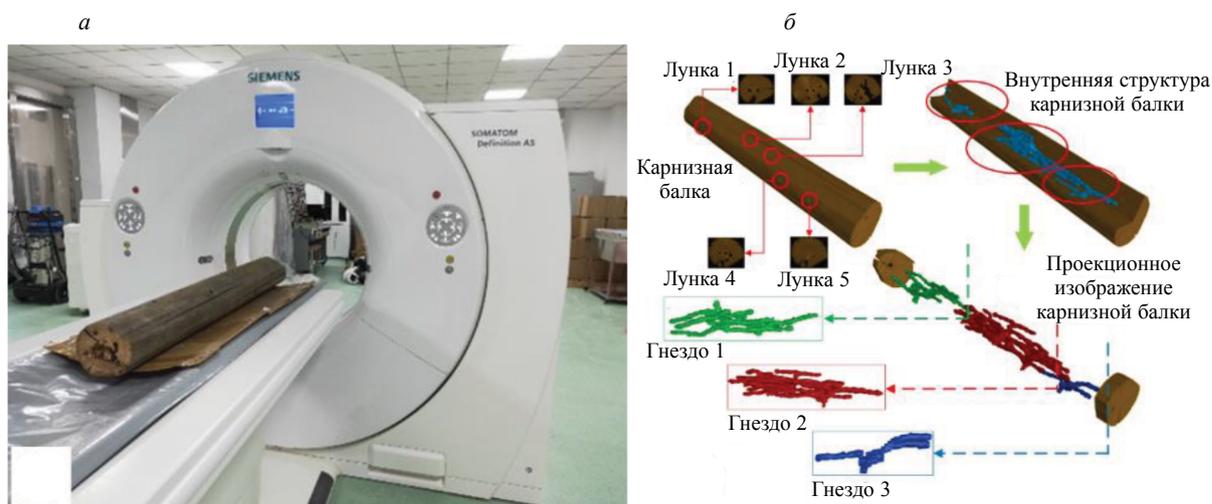


Рис. 5. Контроль и восстановление внутренних дефектов в балке: рентгеновское оборудование для исследования древесины (а); результаты восстановления внутренней структуры карнизной балки (б).

Воздействие рентгеновских лучей, являющихся одним из видов электромагнитного излучения, может привести к потенциальному долгосрочному ущербу для здоровья людей в окружающей среде [38]. Поэтому при использовании метода рентгеновского сканирования необходимо принимать меры защиты. Стоимость, размеры оборудования и проблемы безопасности приводят к тому, что технология рентгеновской визуализации не нашла широкого применения при обследовании зданий. Рентгеновская визуализация — это технология неразрушающего контроля, которая обеспечивает точность результатов и возможность получения четких изображений внутренней структуры деревянных конструкций.

Радиолокационная система

Принцип работы радара заключается в том, чтобы пропускать радиоволны и микроволны через объекты, обнаруживать отраженные сигналы прерывистых волн в среде распространения и анализировать связь между изменениями амплитуды и объектами. Глубина проникновения радара определяется частотой сигнала волны и электромагнитными свойствами среды [39]. Как правило, радар (рис. 6) состоит из пары передающей и приемной антенн, генератора электромагнитных импульсов и системы сбора данных [40].

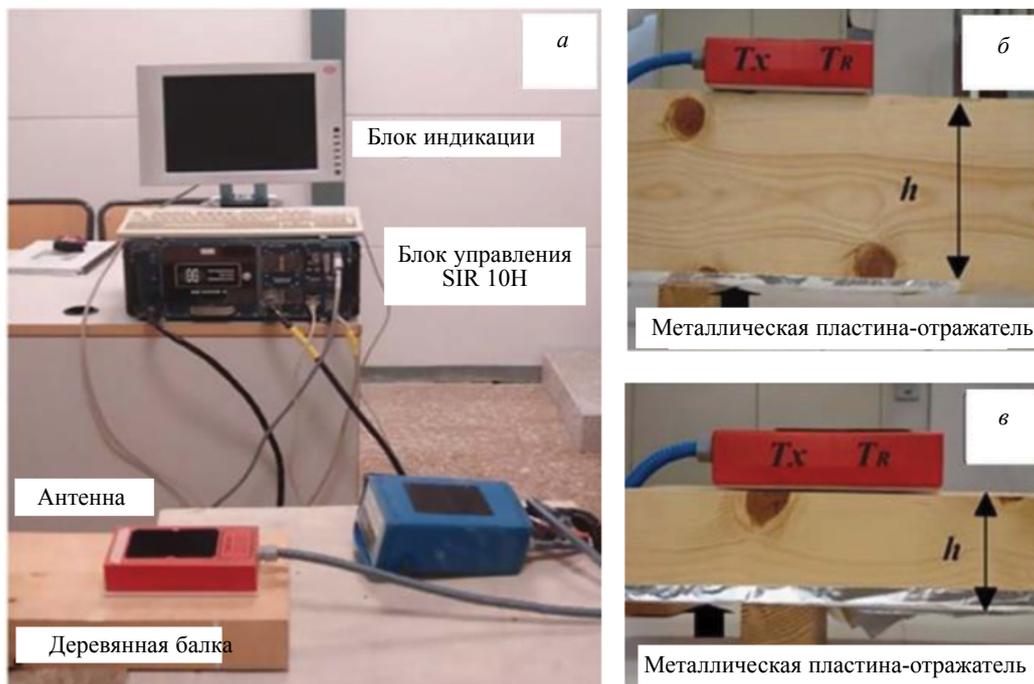


Рис. 6. Устройство SIR-10H, соединенное с 1,6 ГГц-антенной (Geophysical Survey Systems Inc.), и радиолокационные измерения на образцах древесины (а); антенна, расположенная на краю (б) и на поверхности деревянных образцов (в) в процессе сбора данных.

Dayakar Devaru и др. [41] использовали MATLAB для анализа данных радиолокационного сканирования, различения нормальной и поврежденной древесины, обнаружения металлов, сучков и гниения. Yoshihisa Fujii и др. [42] разработали небольшой радар, предназначенный для обнаружения разложения грибков и поражения древесины насекомыми. Однако на результаты обнаружения радара влияют различные факторы, включая влажность, температуру и антикоррозийную обработку, особенно содержание влаги, что может привести к ошибочному распознаванию и пропуску сигнала от дефекта [43]. Основываясь на этом явлении, I. Rodríguez-Abad и др. [44] измерили содержание влаги (СВ) в древесине с помощью радара и убедились, что скорость электромагнитных волн может быть использована для мониторинга изменений содержания влаги в древесине.

С помощью данных о радиолокационных измерениях можно создавать трехмерные изображения, что облегчает восприятие сложных геометрических форм. Maurizio Lualdi и др. [45] обнару-

жили, что плотная сеть радарных линий и подходящая система позиционирования могут быть использованы для построения трехмерных изображений. Однако радар не подходит для объектов, расположенных перпендикулярно земле, таких как колонны и стены. X. Núñez-Nieto и др. [46] использовали срезы, полученных с помощью георадара, для анализа данных, в то время как с помощью модели конечных разностей во временной области имитировали передачу радиолокационных волн в среде с различной влажностью, что дало удовлетворительные результаты.

Метод радиолокации уже неоднократно применялся в таких странах, как Австралия и Испания. Возможность ее применения на месте не вызывает сомнений, и она обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, быстрое распознавание и безопасность [47—50]. Недостатком является то, что внутренние характеристики объекта нелегко различить, что затрудняет определение оптимальной частоты антенны при работе в полевых условиях.

Ультразвуковой метод

Ультразвуковой метод похож на метод волн напряжения тем, что он позволяет оценить форму измеряемого объекта на основе затухания и скорости распространения волны.

Ультразвуковой контроль подразделяется на контактный и бесконтактный методы. Контактный метод предполагает совмещение датчика с подложкой с помощью смазки или непосредственного прикрепления датчика к материалу. Недостатком является то, что контактная жидкость портит поверхность древесины [50]. После длительных исследований был разработан бесконтактный метод, не требующий использования контактных жидкостей [51]. Существует три метода размещения датчиков для ультразвукового контроля: прямой метод, при котором датчик размещается параллельно древесине, и косвенный метод, при котором излучатель и приемник размещаются на одной поверхности (рис. 7). Paulo V. Lourenço и др. [52] показали, что непрямой метод имеет наилучший эффект обнаружения по сравнению с двумя другими методами размещения датчиков.

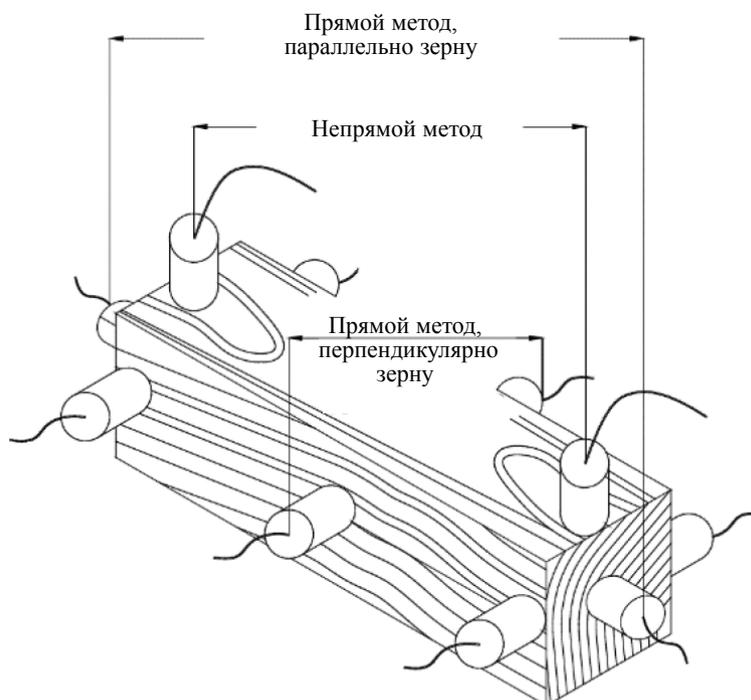


Рис. 7. Стандартная схема ультразвуковых методов контроля.

С помощью метода ультразвукового исследования можно обнаружить внутренние дефекты в древесине [53]. Факторы, влияющие на ультразвуковые измерения, включают геометрию поля

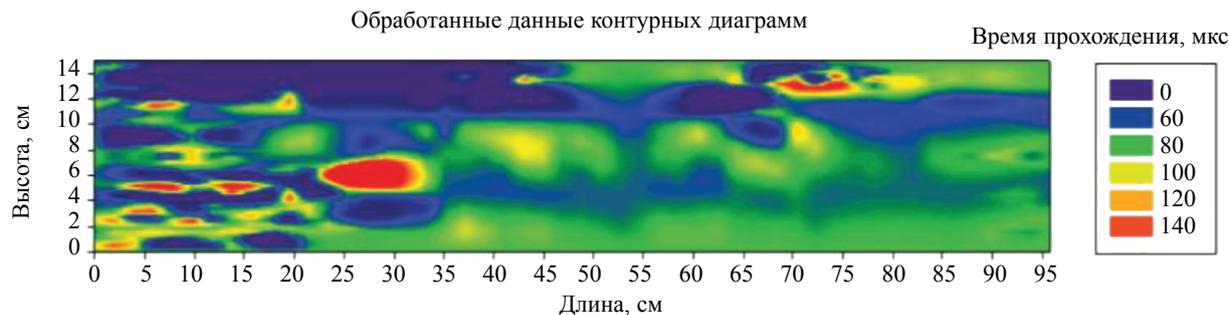


Рис. 8. Результаты определения зоны повреждения в клееных балках с помощью ультразвукового оборудования.

излучения, отражение и преломление волн на макроскопической границе среды, а также явление рассеяния [54]. При использовании компьютерной томографии для анализа времени распространения ультразвука в результатах можно увидеть распадающиеся участки. С развитием технологий появились автоматические томографические системы для поиска дефектов в деревьях [55]. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco и Amanda Rocha Teixeira [56] использовали ультразвук для контроля участка клееного бруса, в котором наблюдалось внутреннее разрушение, а затем применяли изохроматическую карту для отображения поврежденного участка (рис. 8).

Количество дефектов в древесине можно подсчитать, используя скорости ультразвуковых волн сжатия, коэффициенты пропускания и модули упругости в радиальном и тангенциальном направлениях [53, 57].

При объединении ультразвуковой технологии с динамической обобщенной сетью «TimberNet» ультразвуковой сигнал передается в сеть в качестве входного сигнала, что позволяет быстро идентифицировать повреждения и автоматически извлекать признаки повреждений путем вычислений [58]. Этот метод исключает необходимость вмешательства человека, а точность распознавания достигает 100 %. Это демонстрирует исключительную способность сочетать технологию ультразвука с нейронными сетями, что знаменует собой значительный прогресс в области ультразвуковой диагностики. Кроме того, положительные результаты были достигнуты благодаря объединению методов ультразвуковых измерений с эмпирической модовой декомпозицией [59].

По сравнению с различными типами аппаратуры для обнаружения дефектов древесины, метод ультразвука оказывается достаточно эффективным в качестве метода предварительного контроля дефектов [60]. Однако акустический метод обнаружения не позволяет точно определить местоположение и тип дефектов [61]. Кроме того, остается неясной корреляция между влажностью древесины и скоростью распространения ультразвука [61—64].

ДРУГИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Инфракрасная спектроскопия

Метод инфракрасной спектроскопии позволяет обнаружить наличие плесени и раннего гниения в деревянных конструкциях [65]. Гниение постепенно разрушает древесину, поэтому его трудно обнаружить. Гниение деревянных конструкций можно определить с помощью инфракрасной спектроскопии по уменьшению или ослаблению содержания лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы.

Принцип ближней инфракрасной спектроскопии заключается в возбуждении инфракрасным светом колебаний функциональных групп C—H, N—H и O—H в древесине для обнаружения наличия водородсодержащих групп с последующей оценкой соответствующих физических и химических свойств древесины [66]. Спектроскопия в ближней инфракрасной области часто используется в сочетании с другими методами для обнаружения дефектов древесины. Anna Sandak и др. [67] использовали спектроскопию в ближней инфракрасной области для оценки спектра и стехиометрии образцов древесины, обнаружив, что грибы оказывают влияние на полосы лигнина и гемицеллюлозы. Оборудование, используемое для ИК-спектроскопии, состоит в основном из источника света и детектора, как показано на рис. 9. В работе [68] подчеркивается, что при использовании ближней инфракрасной спектроскопии для оценки состояния древесины необходимо

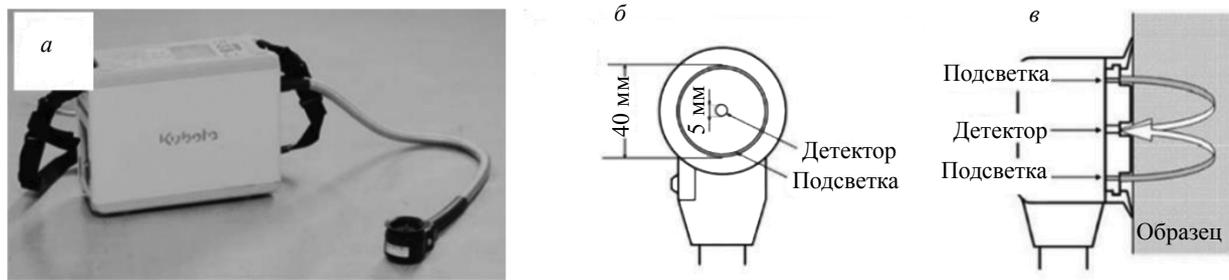


Рис. 9. Фотография портативного спектрофотометра (KBA100R) (а); схема зонда (б); схема облучения и контроля с использованием Vis-NIR light (в).

создать специализированную базу данных с высокоточными эталонными значениями для обеспечения надежной модели оценки. Технология спектроскопии в ближней инфракрасной области обеспечивает многочисленные преимущества, такие как возможность объединения спектральных данных с эталонными значениями посредством многомерного анализа данных и создания моделей прогнозирования различных свойств древесины. Технология спектроскопии позволяет обнаружить начальные процессы гниения деревянных конструкций [69].

Dilek Dogu и др. [70] использовали оптическую микроскопию и инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) для оценки древесины, привезенной из монастыря Великий Метеорон в Греции. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье использовалась для анализа состояния лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы. Было установлено, что древесина подверглась коррозии под воздействием грибков и насекомых.

Пьезокерамические преобразователи

В последние годы был достигнут значительный прогресс в контроле состояния металла и бетона с помощью пьезокерамических преобразователей и активного зондирования, а также значительные достижения в оценке дефектов деревянных конструкций [71]. Принцип метода контроля дефектов древесины с использованием пьезокерамических преобразователей и активного зондирования заключается в активном измерении волн напряжения. Активное зондирование подразумевает использование пьезоэлектрического преобразователя в качестве источника волн напряжения, а генерируемая волна напряжения передается другому пьезоэлектрическому преобразователю. Внутреннее повреждение древесины можно оценить путем измерения затухания волн напряжения. Однако этот метод требует прикрепления датчика к поверхности наблюдаемого объекта с помощью эпоксидной смолы. В этой работе автор предложил показатель повреждений, использующий анализ вейвлет-пакетов, что позволило успешно обнаружить трещины и отверстия в режиме реального времени. Nan Fang и др. [72] сообщили, что пьезокерамические датчики и активное

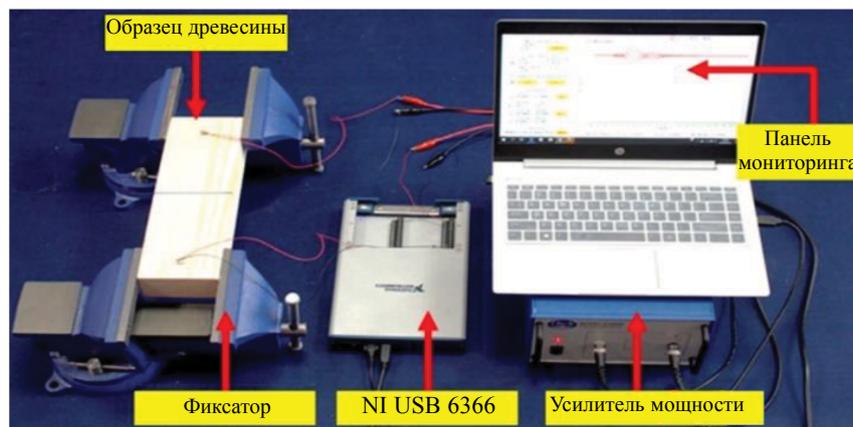


Рис. 10. Оборудование для контроля на основе пьезокерамики.

зондирование были использованы для контроля деревянных конструкций, но результаты оказались неудовлетворительными. Xiong Naibei и др. [73] усовершенствовали метод контроля с помощью пьезокерамических преобразователей и активного зондирования (рис. 10), заменив метод количественной оценки изменения сигнала волны напряжения во временной области на метод визуальной области, и успешно обнаружили трещины в древесине. В табл. 2 приведены восемь типов технологий обнаружения дефектов деревянных конструкций.

Таблица 2

Сравнение методов контроля дефектов в деревянных конструкциях

Метод	Принцип контроля	Способ контроля	Область контроля	Контролируемые типы дефектов	Преимущества	Недостатки
Пенетрометр	Механика	ПРК	Точка	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Малый объем, простота использования, высокая устойчивость к внешним воздействиям	Информация об единичном изменении, влияние износа иглы
Резистограф	Механика	ПРК	Отрезок прямой	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Малый объем, высокая точность и скорость контроля, простота использования, высокая устойчивость к внешним воздействиям	Информация об единичном изменении, влияние износа иглы и скорости сверления
Волна напряжения	Акустика	ПРК	Отрезок прямой/ Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Простота использования, высокая устойчивость к внешним воздействиям	Определение уровня волны напряжения в одном направлении является единым, акустическое отражение подвержено ошибкам
Рентгеновское излучение	Оптика	НК	Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Благодаря технологии компьютерной томографии изображение максимально приближено к контролируемому объекту	Высокая стоимость оборудования, большой объем, в процессе контроля используется ионизирующее излучение
Ультразвук	Акустика	НК	Отрезок прямой / Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Простота использования, высокая скорость контроля, хорошая диаграмма направленности и высокое проникновение (в объект контроля)	Для контроля этим способом необходимо использовать контактную жидкость, тип контактной жидкости вещества, условия контроля, физические свойства объекта могут повлиять на результаты

Окончание табл. 2

Радиолокационная система	Электромагнетизм	НК	Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Малый объем, возможность проведения масштабных исследований за короткое время	Контроль нескольких объектов может привести к пропускам и ошибкам, низкая точность обнаружения дефектов на небольших площадях
Инфракрасная спектроскопия	Колебания молекул	НК	Плоскость	Гниение	Анализ дефектов древесины с химической точки зрения	Можно контролировать только некоторые объекты
Пьезокерамические преобразователи и активное зондирование	Акустика	НК	Плоскость	Растрескивание	Малый объем, Простота использования	Технология в разработке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы неразрушающего контроля имеют различные сценарии применения, и среди них нет абсолютного превосходства или недостатка. В практическом применении эти методы все же имеют некоторые недостатки. Например, радиолокационный и ультразвуковой контроль может оказаться неэффективным для распознавания дефектов на цилиндрических поверхностях со значительной кривизной. Для повышения эффективности обнаружения дефектов в деревянных конструкциях целесообразно создать многофункциональную интегрированную систему. Каждый метод должен пройти всестороннюю оценку, и на основе характеристик каждого метода распределить их по различным этапам процесса контроля. Такой подход позволяет добиться комплексной оптимизации технологий контроля, повышая точность и эффективность данных мониторинга. Оборудование для контроля должно развиваться в направлении большей адаптивности и интеграции для проведения испытаний на месте. На этапе обработки данных оно может быть объединено с такими технологиями, как глубокое обучение, для автоматического сбора и анализа данных, что позволит добиться более точной локализации дефектов и определения их типа. Кроме того, на основе типов и размеров дефектов может быть составлен отчет об анализе механических характеристик деревянных компонентов. Результаты анализа могут быть интегрированы в цифровую информацию о деревянных сооружениях, а алгоритмы могут быть использованы для моделирования эволюции повреждений здания, анализа причин и процессов повреждения деревянных зданий, моделирования влияния повреждений на общую структуру и оценки последствий отказа от ремонта. Разработка решений по устранению дефектов, включая выбор материала и продолжительность консервации после ремонта.

Авторы признательны молодежному проекту Фонда естественных наук провинции Шаньдун, № проекта ZR2020QC174.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Данная работа поддержана Фондом естественных наук провинции Шаньдун, Китай (№ гранта ZR2020QC174), программой развития инноваций и предпринимательства для студентов Китайского национального университета (№ гранта X202310119 и X202210330).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weimin Guo, Xianjun Fan, Ruijing Wu, Tao Shi, Yongchao Ma, Mengzhou Yu, Yue Hu*. Neolithic large-scale wooden structure F63 at the Jijiaocheng site in Lixian county, Hunan // *Archaeology*. 2023, V. 5. P. 41—61.
2. *Tampone Gennaro*. Acquaintance of the ancient timber structures // *Historical constructions*. 2001. P. 117—144.
3. *Xin Yi, Shen Yu*. Reflections on anti-corrosion design of timberwork building from the memorial arch collapse accident // *Journal of Tianjin Chengjian University*. 2013. V. 19. No. 02. P. 87—91.
4. *Peixuan Wang, Shengcai Li, Macchioni Nicola, Palanti Sabrina, Milani Gabriele*. Comprehensive evaluation method of historical timber structural building taking Fujiu Zhou House as an example // *Forests*. 2021. V. 12. No. 9. P. 1—21.
5. *Xingxia Ma, Yunfei Qiao, Dongqing Li, Yanhua Wang*. Biological hazard prevention and protection system for wood components in ancient buildings // *Chinese Journal of Wood Science and Technology*. 2023. V. 37. No. 01. P. 83—90.
6. *Qian Zhou, Weiming Yan, Jinbao Ji*. Typical aseismic construction problems in ancient Chinese wooden buildings of the Ming and Qing Dynasties // *Sciences of Conservation and Archaeology*. 2011. V. 23. No. 02. P. 36—48. <https://doi.org/10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2011.02.001>
7. *Hansen Christian Pilegaard*. Application of the Pilodyn in forest tree improvement. Humblebaek: Danida Forest Seed Centre 11, 2002.
8. *Thaler Nejc, Lesar Boštjan, Humar Miha*. Correlation between brown rot decay and Pilodyn measurements // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2012. V. 70. No. 6. P. 893—895. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0617-8>
9. *Dajun Shang, Xinfang Duan, Zhongping Yang, Pingping Wang, Guanwu Zhou*. Research on some decayed and insect-attacked ancient wood members in part of Xizang by PILODYN nondestructive evaluation method // *Forestry Science & Technology*. 2007. V. 5. P. 53—55.
10. *Rongfeng Huang, Yanmei Wu, Hua Li, Xiuying Liu*. Quantitative analysis of decaying detected by Pilodyn in wood of ancient architecture // *Scientia Silvae Sinicae*. 2010. V. 46. No. 10. P. 114—118.
11. *Tannert Thomas, Anthony Ronald W., Kasal Bohumil, Kloiber Michal, Piazza Maurizio, Riggio Mariapaola, Rinn Frank, Widmann Obert, Yamaguchi Obuyoshi*. In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques // *Materials and Structures*. 2014. V. 47. P. 767—785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>
12. *Anagnostopoulou Vasiliki, Pournou Anastasia*. Correlating visual grading with NTD methods for assessing timber condition in historic buildings // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 273—280. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.273>
13. *Rongfeng Huang, Xiaohuan Wang, Hua Li, Xiuying Liu*. Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture // *Journal of Beijing Forestry University*. 2007. V. 6. P. 167—171.
14. *Houjiang Zhang, Leil Zhu, Yanliang Sun, Xiping Wang, Haicheng Yan*. Determining modulus of elasticity of ancient structural timber // *Advanced Materials Research*. 2011. V. 217. P. 407—412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.217-218.407>
15. *Li Xin, Qianb Wei, Chang Lihong*. Analysis of the density of wooden components in ancient buildings by micro-drilling resistance, using information diffusion // *BioResources*. 2019. V. 14. No. 3. P. 5777—5787. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.5777-5787>
16. *Jerzy Jasieńko, Tomasz Nowak, Łukasz Bednarz*. Wrocław university's Leopoldinum Auditorium—tests of its ceiling and a conservation and strengthening concept // *Advanced Materials Research*. 2010. V. 133. P. 265—270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.265>
17. *Xiping Wang, Teder Marko, Wacker James*. Condition assessment of the timber structures of a century-old industrial building using a nondestructive inspection procedure // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 840—848.
18. *Cabaleiro I Manuel, Branco Jorge M., Sousa Hélder S., Conde Borja*. First results on the combination of laser scanner and drilling resistance tests for the assessment of the geometrical condition of irregular cross-sections of timber beams // *Materials and Structures*. 2018. V. 51. P. 1—15. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1225-9>
19. *Cuartero Jaime, Cabaleiro Manuel, Sousa Hélder S., Branco Jorge M*. Tridimensional parametric model for prediction of structural safety of existing timber roofs using laser scanner and drilling resistance tests // *Engineering Structures*. 2019. V. 185. P. 58—67. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.096>
20. *Kolsky H*. Stress waves in solids // *Courier Corporation*. 1963. V. 1. P. 88—110.
21. *Wensu Lin, Jinhua Wu*. Study on application of stress wave for nondestructive test of wood defects // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 401. P. 1119—1123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.1119>
22. *Lihai Wang, Huadong Xu, Cilin Zhou, Li Li, Xuechun Yang*. Effect of sensor quantity on measurement accuracy of log inner defects by using stress wave // *Journal of Forestry Research*. 2007. V. 18. No. 3. P. 221—225. <https://doi.org/10.1007/s11676-007-0045-5>

23. *Shanqing Liang, Fu Feng*. Effect of sensor number and distribution on accuracy rate of wood defect detection with stress wave tomography // *Wood Research*. 2014. V. 59. No. 4. P. 521—532.
24. *Hailin Feng, Yiming Fang, Jian Li, Guanghui Li*. Using stress wave based technology for wood material nondestructive testing // *Advanced Materials Research*. 2011. V. 143. P. 265—270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.143-144.265>
25. *Zhan Huan, Zhi Jiao, Guanghui Li, Xi Wu*. Velocity error correction based tomographic imaging for stress wave nondestructive evaluation of wood // *BioResources*. 2018. V. 13. No. 2. P. 2530—2545. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2530-2545>
26. *Xiaochen Du, Shaozhe Li, Guanghui Li, Hailin Feng, Shenyong Chen*. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation // *BioResources*. 2015. V. 10. No. 3. P. 3948—3962.
27. *Xiaochen Du, Jiajie Li, Hailin Feng, Shengyong Chen*. Image reconstruction of internal defects in wood based on segmented propagation rays of stress waves // *Applied Sciences*. 2018. V. 8. No. 10. P. 1—18. <https://doi.org/10.3390/app8101778>
28. *Xiaochen Du, Hailin Feng, Mingyue Hu, Shengyong Chen*. Three-dimensional stress wave imaging of wood internal defects using TKriging method // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. V. 148. P. 63—71. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.005>
29. *Junjie Zhang, Khoshelham Kourosh*. 3D reconstruction of internal wood decay using photogrammetry and sonic tomography // *The Photogrammetric Record*. 2020. V. 35. No. 171. P. 357—374. <https://doi.org/10.1111/phor.12328>
30. *Osterloh Kurt R. S., Bücherl Thomas, Hasenstab Andreas, Rädels Christoph, Zscherpel Uwe, Meinel Dietmar, Weidemann Gerd, Goebels Jürgen, Ewert Uwe*. Fast neutron radiography and tomography of wood as compared to photon based technologies / *Proceedings of DIR 2007—International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, 2007. Lyon, France.
31. *Funt Brian V., Bryant Edwin C.* Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography images // *Forest Products Journal*. 1987. V. 37. No. 1. P. 56—62.
32. *Skog Johan, Oja Johan*. Density measurements in pinus sylvestris sawlogs combining X-ray and three-dimensional scanning // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2010. V. 25. P. 470—481. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.509326>
33. *Lechner Thomas, Sandin Ylva, Kliger Robert*. Assessment of density in timber using X-ray equipment // *International Journal of Architectural Heritage*. 2013. V. 7. P. 416—433. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.642055>
34. *Fujita Kaori, Shin Eunmi, Ibaraki Akito, Sanuki Masashi*. Earthquake response monitoring and structural analysis of traditional Japanese timber temple // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 823—828. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.823>
35. *Yisheng Gao, Zhedong Ge, Jiaqi Fang, Xiaoxia Yang, Yucheng Zhou*. Effect of carpenter bee nests on timber building components Based on computed tomography (CT) // *BioResources*. 2022. V. 17. No. 2. P. 3320—3331. <https://doi.org/10.15376/biores.17.2.3320-3331>
36. *Björngrim Niclas, Myronycheva Olena, Fjellström Per-Anders*. The use of large-scale X-ray computed tomography for the evaluation of damaged structural elements from an old timber bridge // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. V. 17. No. 6. P. 1028—1029. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2137697>
37. *Keying Long, Kaiqiang Chen, Lanying Lin, Feng Fu, Yong Zhong*. Deterioration of microstructures and properties in ancient architectural wood from Yingxian wooden pagoda (1056 AD) during natural aging // *Forests*. 2023. V. 14. P. 1—12. <https://doi.org/10.3390/f14020393>
38. *Sklarczyk Christoph, Porsch Felix, Wolter Bernd, Boller Christian, Kurz Jochen H.* Nondestructive characterization of and defect detection in timber and wood // *Advanced materials research*. 2013. V. 778. P. 295—302. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.295>
39. *Harry M.J.* Chapter 1—Electromagnetic principles of ground penetrating radar. Ground penetrating radar: Theory and applications / 1st edn. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. P. 1—40.
40. *Kasal Bohumil, Tannert Thomas*. In situ assessment of structural timber // *Springer Science & Business Media*. 2011. P. 7. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0560-9>
41. *Devaru Dayakar, Halabe Udaya B., Gopalakrishnan B., Agrawal Sachin, Grushecky Shawn*. Algorithm for detecting defects in wooden logs using ground penetrating radar // *Intelligent Systems in Design and Manufacturing*. 2005. V. 5999. P. 110—121. <https://doi.org/10.1117/12.630835>
42. *Fujii Yoshihisa, Fujiwara Yuko, Yanase Yoshiyuki, Mori Takuro, Yoshimura Tsuyoshi, Nakajima Masao, Tsusumi Hiroki, Mori Mitsunori, Kurisaki Hiroshi*. Development of radar apparatus for scanning of wooden-wall to evaluate inner structure and bio-degradation non-destructively // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 289—294. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.289>
43. *Butnor J.R., Pruyne M.L., Shaw D.C., Harmon M.E., Mucciardi A.N., Ryan M.G.* Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges // *Forest pathology*. 2009. V. 39. P. 309—322. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00590.x>

44. *Rodríguez Abad I., Martínez-Sala R., Capuz Lladró R., Díez Barra R., García-García F.* Assessment of the variation of the moisture content in the pinus pinaster ait using the non destructive GPR technique // *Materiales de Construcción*. 2011. V. 61. No. 301. P. 143—156. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.49608>
45. *Lualdi Maurizio, Zanzi Luigi, Binda Luigia.* Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations / *Proceedings, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 2003, Berlin, Germany*.
46. *Núñez-Nieto X., Solla M., Novo A., Lorenzo H.* Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling // *Construction and Building materials*. 2014. V. 71. P. 551—560. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.083>
47. *Muller W.* Timber girder inspection using ground penetrating radar // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2003. V. 45. No. 12. P. 809—812.
48. *Pérez Gracia V., Santos-Assunção S., Caselles O., Clapés J., Canas J.A.* Study of wood beams in buildings with ground penetrating radar / *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014*.
49. *Pérez Gracia V., Caselles O., Clapés J., Santos-Assunção S.* GPR building inspection: Examples of building structures assessed with ground penetrating radar / *Proceedings of 9th international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR)*. IEEE, 2017.
50. *Beall F.C.* Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties // *Wood Science and Technology*. 2002. V. 36. P. 197—212. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>
51. *Marcantonio Vera, Monarca Danilo, Colantoni Andrea, Cecchini Massimo.* Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 120. P. 32—42. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.10.012>
52. *Lourenço Paulo B., Feio Artur O., Machado José S.* Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood // *Construction and Building Materials*. 2007. V. 21. No. 8. P. 1617—1627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.011>
53. *Xuechun Yang.* Testing theories and experiments of log inner decay based on stress-wave technology. PhD dissertation, Northeast Forestry University, 2004.
54. *Bucur Voichita, Böhnke Isabelle.* Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood // *Ultrasonics*. 1994. V. 32. No. 5. P. 385—390.
55. *Brancheriau L., Ghodrati A., Gallet P., Thaunay P., Lasaygues P.* Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees (*Picea abies*) // *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. V. 353. P. 1—13. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/353/1/012007>
56. *Mantilla Carrasco Edgar Vladimiro, Rocha Teixeira Amanda.* Methodology for inspection of wood pathologie using ultrasonic pulses // *Cerne*. 2012. V. 18. P. 479—486.
57. *Tallavo Fernando, Cascante Giovanni, Pandey Mahesh D.* A novel methodology for condition assessment of wood poles using ultrasonic testing // *NDT&E International*. 2012. V. 52. P. 149—156. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.08.002>
58. *Yang Zhang, Kaveng Yuen, Mousavi Mohsen, Gandomi Amir H.* Timber damage identification using dynamic broad network and ultrasonic signals // *Engineering Structures*. 2022. V. 263. P. 1—11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114418>
59. *Mousavi Mohsen, Taskhiri Mohammad Sadegh, Holloway Damien, Olivier J.C., Turner Paul.* Feature extraction of wood-hole defects using empirical mode decomposition of ultrasonic signals // *NDT and E International*. 2020. V. 114. P. 1—10. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102282>
60. *Hasníková Hana, Kuklík Petr.* Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure // *Wood research*. 2014. V. 59. No. 3. P. 411—420.
61. *Reinprecht Ladislav, Šupina Pavol.* Comparative evaluation of inspection techniques for impregnated wood utility poles: Ultrasonic, drill-resistive, and CT-scanning assessments // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015. V. 73. P. 741—751. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0943-8>
62. *Morales Conde M.J., Rodríguez Liñán C., de Hita P. Rubio.* Use of ultrasound as a nondestructive evaluation technique for sustainable interventions on wooden structures // *Building and environment*. 2014. V. 82. P. 247—257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.022>
63. *Verbist Maxime, Matos Filipe T., Branco Jorge M.* Structural and health assessment of historic timber roofs from the Convent of Christ in Tomar // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2019. V. 9. P. 491—511. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00347-6>
64. *Nowak Tomasz, Karolak Anna, Sobótka Maciej, Wyjadłowski Marek.* Assessment of the condition of Wharf timber sheet wall material by means of selected non-destructive methods // *Materials*. 2019. V. 12. P. 1532—1554. <https://doi.org/10.3390/ma12091532>
65. *Jelle Bjørn Petter, Hovde Per Jostein.* Fourier transform infrared radiation spectroscopy applied for wood rot decay and mould fungi growth detection // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2012. V. 19. P. 1—6. <https://doi.org/10.1155/2012/969360>
66. *Schwanninger Manfred, Rodrigues José Carlos, Fackler Karin.* A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components // *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2011. V. 19. P. 287—308.

67. Sandak Anna, Ferrari Silvia, Sandak Jakub, Allegretti Ottaviano, Terziev Nasko, Riggio Mariapaola. Monitoring of wood decay by near infrared spectroscopy // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 802—809. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.802>
68. Sandak Anna, Riggio Mariapaola, Sandak Jakub. Non destructive characterization of wooden members using near infrared spectroscopy // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 328—334. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.328>
69. Sandak Anna, Sandak Jakub, Riggio Mariapaola. Assessment of wood structural members degradation by means of infrared spectroscopy: an overview // *Structural Control and Health Monitoring*. 2016. V. 23. P. 396—408. <https://doi.org/10.1002/stc.1777>
70. Dogu Dilek, Yilgor Nural, Mantanis George, Tuncer Fatma Digidem. Structural evaluation of a timber construction element originating from the great metéoron monastery in Greece // *BioResources*. 2017. V. 12. No. 2. P. 2433—2451.
71. Jicheng Zhang, Yongshui Huang, Yu Zheng. A feasibility study on timber damage detection using piezoceramic-transducer-enabled active sensing // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 5. P. 1—11.
72. Fang Han, Jinwei Jiang, Kai Xu, Ning Wang. Damage detection of common timber connections using piezoceramic transducers and active sensing // *Sensors*. 2019. V. 19. P. 1—12. <https://doi.org/10.3390/s19112486>
73. Haibei Xiong, Lin Chen, Cheng Yuan, Qingzhao Kong. A novel piezoceramic-based sensing technology combined with visual domain networks for timber damage quantification // *Frontiers in Materials*. 2021. V. 8. P. 1—12. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.688594>
-